

## 커먼레일식 디젤 인젝터의 충돌 분무에 대한 실험적 연구 (2) -미립화 특성-

### An experimental study on the impingement spray of a common-rail diesel injector (2) -atomization characteristics-

이 창 식\*, 박 성 옥\*\*, 서 상 현\*\*

C. S. Lee, S. W. Park, S. H. Seo

#### ABSTRACT

In this study, the experimental study on atomization characteristics of the fuel spray impinging on the wall was performed at different wall distances and angles of wall inclination. The fuel injection system was composed based on the common-rail system, and the injection signal was synchronized by the delay generator. The atomization characteristics of the injected spray were analyzed in terms of the SMD and velocities which were measured by using the phase Doppler particle analyzer system.

It is revealed that the free spray is atomized actively above 50mm from the injector tip. In the cases of the impinged spray, the SMD and velocity of the impinged spray are smaller than those of the free spray. The impinged spray has the maximum velocity near the 35mm of the radial distance from the injector axis, and the atomization performance is enhanced with the decrease of the wall distance.

**주요기술용어(Key Words):** Impingement spray (충돌 분무), Atomization (미립화), SMD (Sauter 평균 입경), Common-rail injector (커먼레일 인젝터)

#### 기호설명

$A_w$  : angle of wall inclination  
 $L_R$  : radial distance from the injector axis  
 $L_w$  : wall distance  
 $L_{wz}$  : axial distance from the wall  
 $L_z$  : axial distance from the injector tip  
 $V_R$  : radial velocity  
 $V_z$  : axial velocity

#### 1. 서 론

고압 분사 디젤 엔진에서 연료 분무와 연소실 벽면의 충돌이 불가피하며, 연료 분무와 벽면의 상호 작용은 연료 공기 혼합기 형성에 영향을 미치는 중요한 인자 중의 하나이다. 연료 분무의 연소실 벽면 충돌은 분무의 2차 미립화를 유도하는 긍정적인 요인도 있으나, 연소실 벽면의 유막 형성으로 인해 HC, Soot 등의 유해 배출물 증가의 원인이 되기도 한다. 따라서 미립화 성능의 향상이나 배출물 저감을 위해서는 연소실 벽면 충돌시의 분무의 거동을 파악

\* 한양대학교 기계공학부

\*\* 한양대학교 대학원

하는 것이 필요하다.

Ko와 Arai<sup>(1)</sup>,<sup>(2)</sup>는 충돌면의 거리와 분위기 압력이 충돌 분무시의 분무 선단의 도달 거리를 조사하여, 경험식을 제시하였다. Montajir 등<sup>(3)</sup>은 연소실 형상에 따른 분무의 벽면 충돌 특성에 대해 연구하였으며, 서 등<sup>(4)</sup>은 커먼레일식 디젤 인젝터를 사용하여, 분사 압력, 분위기 압력, 벽 거리, 충돌면의 온도 등에 따른 연료 분무의 거시적 충돌 특성에 대해 조사하였다.

분열 형상과 분무 선단의 도달 거리 등에 관한 거시적인 연구와 더불어 벽면 충돌 시의 평균 입경 분포나 속도에 관한 미시적 연구도 진행되고 있다. Schunemann 등<sup>(5)</sup>은 충돌면 2mm 상류에서 입경과 속도를 측정하여, 분위기 압력과 충돌면의 온도가 미립화와 주위 유동에 미치는 영향을 조사하였다. Meingest 등<sup>(6)</sup>은 PDA 장치를 이용하여 충돌시의 시간에 따른 입경과 속도의 변화를 측정하였다.

기존의 분무의 도달 거리나 분무 폭에 대한 거시적 연구로는 충돌이 분무 미립화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기가 어렵고, 입경이나 속도에 관한 연구들도 측정점이나 실험 조건이 제한되어 있다. 따라서 본 연구에서는 커먼레일식 고압 디젤 인젝터를 사용하여 충돌 거리와 충돌 각도가 SMD와 속도 분포 등의 미시적 분무 특성에 미치는 영향을 PDPA 시스템을 이용하여 실험적으로 분석하였다. 또한 자유 분무와 미립화 특성을 비교하여 충돌로 인한 2차 미립화가 SMD 분포에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

커먼레일식 고압 디젤 인젝터 분무가 벽면에 충돌할 때 입경과 속도를 측정하기 위하여 Fig. 1 과 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치는 연료 공급 장치, 분사 시스템과 PDPA 시스템으로 구성된다. 두 개의 펌프를 병렬로 연결하여 고압의 연료를 안정적으로 커먼레일로 공급하였으며, 신호 발생기를 이용하여 인젝터의 분사 신호와 PDPA 시스템의 신호 분

석기를 동기화하였다.

입경 및 속도를 재측하기 위해 사용된 PDPA 시스템의 광원으로는 최대 출력 5W의 Ar-ion 레이저를 사용하였다. 연료 액적이 PDPA 시스템의 측정점을 통과하면 검출부에 산란광이 검출되고, 이 신호의 위상차와 도플러 주파수를 신호 분석기에서 입경과 속도를 구하게된다. PDPA 시스템의 구체적인 계원은 Table 1과 같다.

### 2.2 실험 방법

본 실험에는 지름이 0.3mm인 커먼레일식 전자 제어 단공 인젝터를 사용하였으며 분사 압력은 80MPa, 분사 기간은 1ms로 하였다. 인젝터와 벽 사이의 거리와 충돌각도가 따른 미립화 특성을 분석하기 위하여 벽 거리 30mm, 50mm, 70mm와 충돌 각도 0°, 30°, 45° 에서 실험을 수행하였다. 구체적인 실험 조건은 Table 2와 같다.

PDPA 시스템의 데이터 취득은 두 채널이 동시에 취득한 데이터가 10000개가 되도록 하였으며 유효 입경 범위는 2 $\mu$ m에서 100 $\mu$ m로 하였다. 광원부의 출력은 측정 데이터율과 산란 강도 등을 고려하여 15W로 실험하였다.

충돌 분무의 입경과 속도는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 인젝터 축방향으로 5mm 간격, 반경 방향으로 4mm 간격으로 측정하였다.

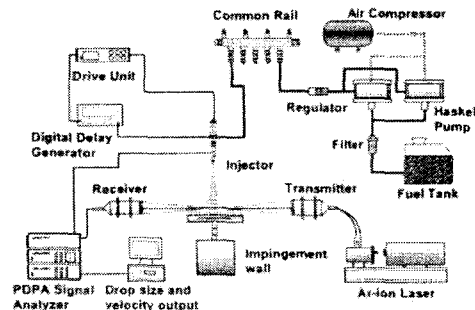


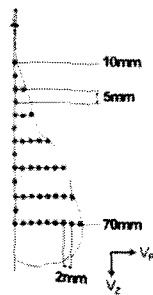
Fig. 1 Schematic diagram of PDPA system

Table 1 Specifications of PDPA system

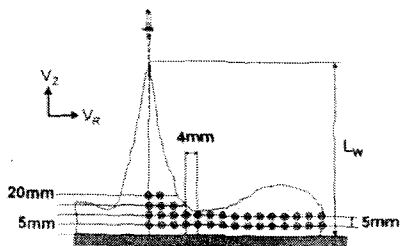
Wave length	514.5nm, 488nm
Laser beam diameter	1.4mm
Beam expander ratio	0.5
Fringe spacing	12.865 $\mu\text{m}$ , 12.202 $\mu\text{m}$
Fringe number	36
Beam waist diameter	467.916 $\mu\text{m}$ , 443.815 $\mu\text{m}$
Focal length	500mm for transmitter 250mm for Receiver
Collection angle	30°
PMT voltage	500V

Table 2 Experimental conditions

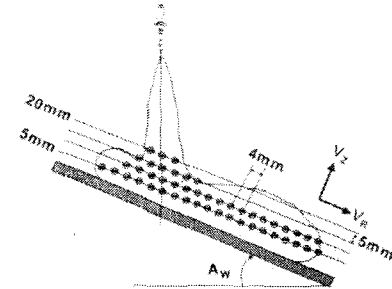
Injection system	Common-rail
Number of holes	1
Hole diameter	0.3mm
Rail pressure	80MPa
Injection duration	1ms
Ambient pressure	0.1MPa
Ambient temperature	293K
Nozzle-wall distance	30mm, 50mm, 70mm
Inclined angle of the wall	0°, 30°, 45°
Amount of injected fuel	20.13mg/cycle



(a) Free spray



(b) Impingement spray ( $A_w=0^\circ$ )



(c) Impingement spray ( $A_w=30^\circ, 45^\circ$ )

Fig. 2 Test points of measurements for PDPA

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 자유 분무 실험 결과

충돌 분무와 자유 분무의 미립화 특성을 비교하기 위해 자유 분무의 입경과 속도 분포를 측정하여 다음과 같이 분석하였다.

Fig. 3은 분무의 중심 축 방향 거리에 따른 액적의 평균 입경과 속도 분포이다. SMD는 노즐 출구에서 축 방향 거리 55mm 지점까지 감소하는 반면 D10의 경우에는 20mm 하류에서는 거의 일정하였다. 이는 SMD와 D10의 상관 관계를 고려하여 볼 때, 대부분의 액적들이 20mm 지점에서 분열 한계에 도달하여 더 이상 분열이 진행되지 않으나 상대적으로 크기가 큰 분열되지 않은 액적들로 인해 SMD가 크게 측정되는 것으로 판단된다. 이런 큰 액적들도 55mm 지점에서는 거의 분열이 완료되는 것으로 보인다. 축 방향 평균 속도는 SMD와 거의 비슷한 경향을 보이며, 노즐 출구 부근에서 급격히 감소하다가, 25mm 하류에서는 거의 값이 일정하였다.

Fig. 4는 축 방향 거리 30mm, 50mm, 70mm 지점에서 분사 시작 후 시간에 따른 속도와 입경의 분포이다. 축 방향 속도의 경우, 분사 후 1ms까지는 속도가 급격히 감소하다가 그 이후에는 거의 일정하였다. 축 방향 거리 70mm 지점의 경우, 30mm 지점에 비하여 속도의 편차가 커지고 최대 속도는 감소하였다. 시간에

따른 SMD의 경우 시간 간격을 0.5ms로 계산하였다. 축 방향 속도는 시간에 따른 경향이 뚜렷한 반면, SMD는 시간에 따라서는 크게 변하지 않았으나, 하류로 내려오면서 미립화가 진행되는 것으로 나타났다.

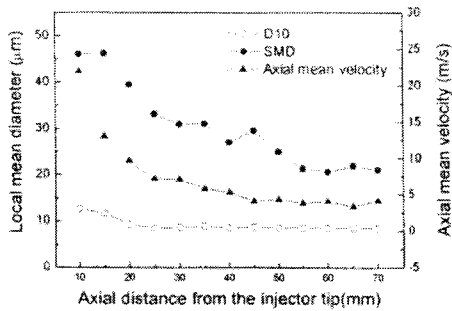


Fig. 3 Mean diameter and velocity according to the axial distance

Figs. 5와 6은 반경 방향에 따른 SMD와 축 방향 속도이다. SMD와 속도 모두 중심축에서 최대값을 나타내었으며, 분무 외곽으로 나갈수록 값이 감소하였다. 축 방향 거리 30mm 지점에서는 이런 경향이 뚜렷하였으나, 하류로 진행할수록 반경 방향에 따른 감소 폭이 줄어들었다. 이러한 경향으로 볼 때 30mm 지점에서는 액주의 영향이 크나 하류로 내려올수록 영향이 줄어드는 것으로 판단된다.

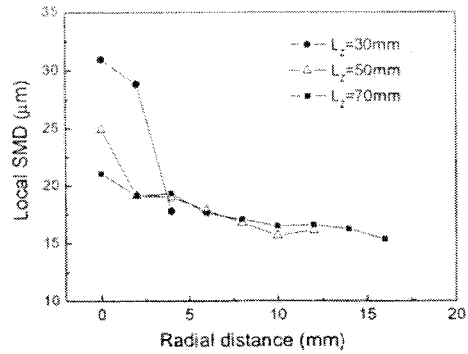


Fig. 5 SMD distribution according to the radial distance

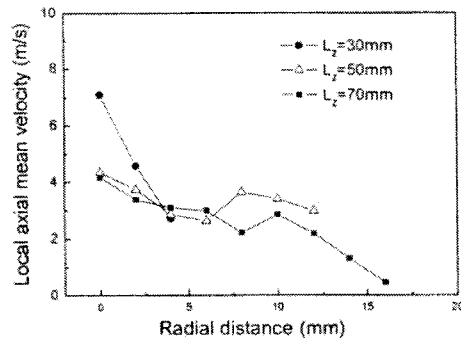


Fig. 6 Axial mean velocity distribution according to the radial distance

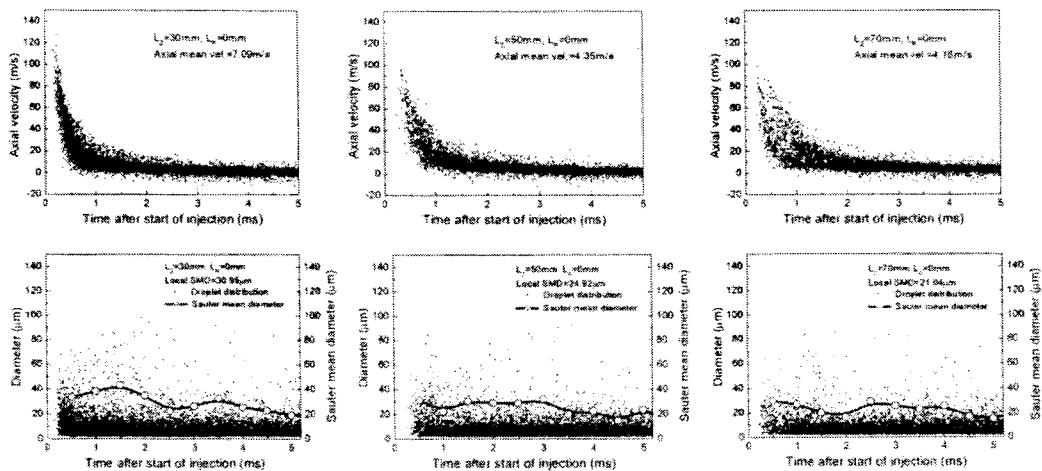


Fig. 4 Velocity and diameter distribution according to the time after start of injection

시간의 경과에 따른 전체 분무의 미립화 특성을 파악하기 위하여, Fig. 7과 같이 전체 분무의 SMD와 축 방향 속도 분포를 분사 후 시간의 경과에 대해 나타내었다. SMD 분포를 볼 때 분사 시작 3ms 경과 후 분무의 미립화가 거의 완료되는 것으로 보이며, 액적들의 평균 속도는 분사 초기에는 급격히 감소하다가, 시간이 경과할수록 감소폭이 줄어들었다.

Fig. 8은 전체 측정 시간의 SMD와 속도를 Fig. 2(a)의 측정점의 결과를 보간하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 노즐 부근 중심축에서 SMD가 최대이며, 외곽에서는 SMD가 줄어들었다. 이러한 경향은 분무 외곽으로 진행될수록 주위 기체의 영향으로 인해 액적들이 받는 항력이 커져 미립화가 촉진되고, 분열이 진행되어 운동량이 작은 액적들이 주변 유동에 의해 외곽으로 밀려 나오기 때문인 것으로 판단된다.

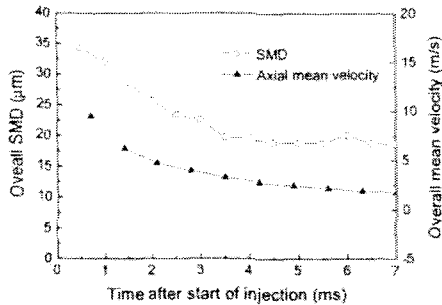


Fig. 7 Overall SMD and mean velocity

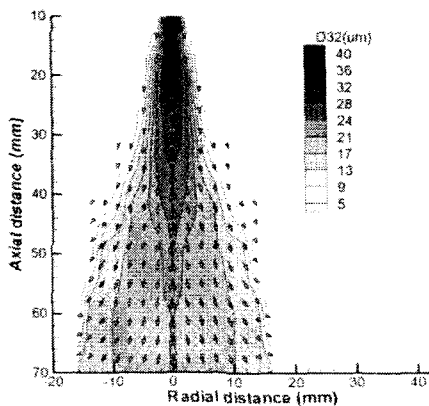


Fig. 8 Velocity and SMD distribution (free spray)

3.3. 충돌 분무 실험 결과

Fig. 9는 인젝터와 벽 사이의 거리가 50mm인 경우, 시간의 경과에 따른 SMD와 속도 변화를 자유 분무 결과와 비교한 것이다. 자유 분무의 경우에는 충돌 분무와 측정 영역을 일치시키기 위하여 30mm 하류의 결과만을 계산에 포함하였다. 자유 분무의 SMD는 2.0ms 경과 후에는 거의 일정한 반면, 충돌 분무의 경우에는 분사 후 4.0ms까지 SMD가 감소하였다. 이는 분무와 벽면의 충돌로 인해 2차 미립화가 일어나기 때문으로 판단된다. 평균 속도의 경우에는 충돌 분무가 자유 분무에 비해 전 영역에서 작게 나타났다.

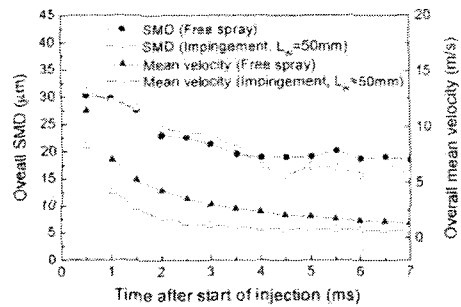


Fig.9 Comparison between free spray and impingement spray

Fig. 10은 인젝터와 충돌면 사이의 거리가 50mm인 경우, 충돌면 상류 5mm와 10mm에서 SMD와 반경 방향 속도를 측정된 결과이다. 충돌면 5mm 상류에서는 중심축에서 SMD가 최대값을 보이며 15mm외곽에서는 거의 값이 일정하였다. Fig. 5의 자유 분무의 경우, 반경 방향 8mm 이후에는 SMD가 거의 일정한 것과 비교하면, 8mm 이후에는 2차 미립화의 영향으로 SMD가 감소하는 것으로 보인다. 반경 방향 속도는 반경 방향 35mm 부근에서 최대가 되는 것으로 나타났다. 충돌면 10mm 상류의 경우에는 SMD 분포가 자유 분무의 경우와 거의 비슷하여, 충돌의 영향을 거의 받지 않는 것으로 보인다.

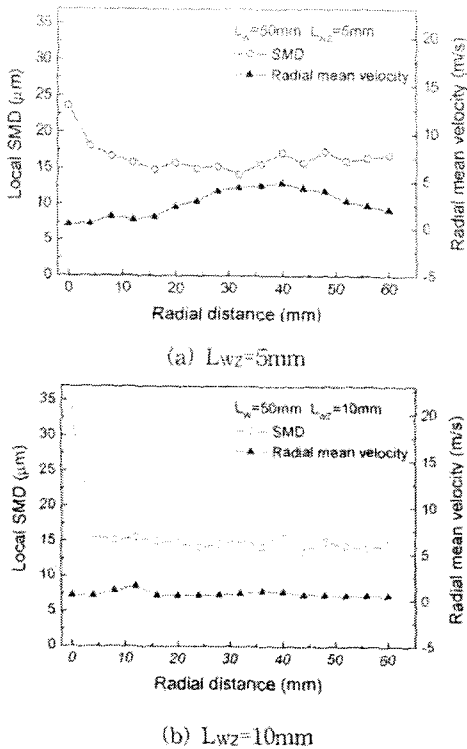


Fig. 10 SMD and mean velocity ( $L_w=50\text{mm}$ )

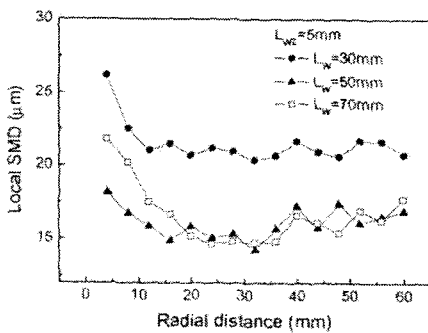


Fig. 11 Effect of injector-wall distance on the SMD distribution

인젝터와 충돌면 사이의 거리가 SMD와 반경 방향 속도에 미치는 영향을 조사하기 위해 충돌면 5mm 상류에서 반경 방향에 대한 SMD와 속도 분포를 Fig. 11에 나타내었다. 충돌면의 거리가 50mm인 경우 반경 방향 20mm 내부에서는 70mm인 경우보다 SMD가 작은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 50mm인 경우가 70mm인 경우보다 충돌로 인해 2차 미립화의

영향이 더 크기 때문으로 판단된다. 반경 방향 속도의 경우, 벽거리가 짧아질수록 크게 나타났다. 최대 반경 방향 속도를 가지는 지점이 분무 중심부로 이동하였다.

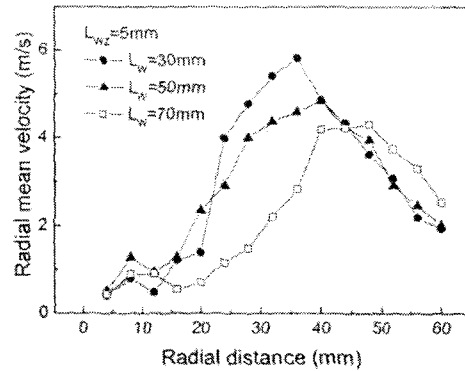


Fig. 12 Effect of injector-wall distance on the radial mean velocity

Fig. 13은 PDPA를 이용하여 측정된 SMD와 속도 결과를 보간하여 나타낸 것이다. 액적들의 이동 방향을 보면, 분무 중심축 부근에서는 하류로 향하는 액적들이 많으며, 반경 방향 15mm 이후에는 충돌로 인해 상류로 이동하는 액적들이 우세한 것으로 나타났다. 인젝터와 충돌면의 거리가 30mm와 50mm인 경우, 충돌면 부근에서 분무 외곽으로 나아갈수록 2차 미립화의 영향으로 SMD가 급격히 감소하였으나, 70mm인 경우에는 상대적으로 큰 액적들이 반경 방향 10mm 외곽에 존재하였다.

Fig. 14는 충돌면의 기울기에 따른 SMD 분포이다. 분무 중심에서 동일 진행 거리에서의 비교하기 위해 Fig. 2 (c)와 같이 반경 방향 거리를 충돌면과 평행하게 정의하였다. 충돌면 5mm 상류에서는 충돌면의 기울기가 SMD 분포에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 15의 전체 분무의 시간에 따른 SMD 변화율 보면, 기울임 작도가 작을수록 SMD가 작아지는 것으로 나타났다. 이는 분무의 진행 방향과 충돌면이 수직인 경우 2차 미립화가 가장 활발히 일어나기 때문인 것으로 판단된다.

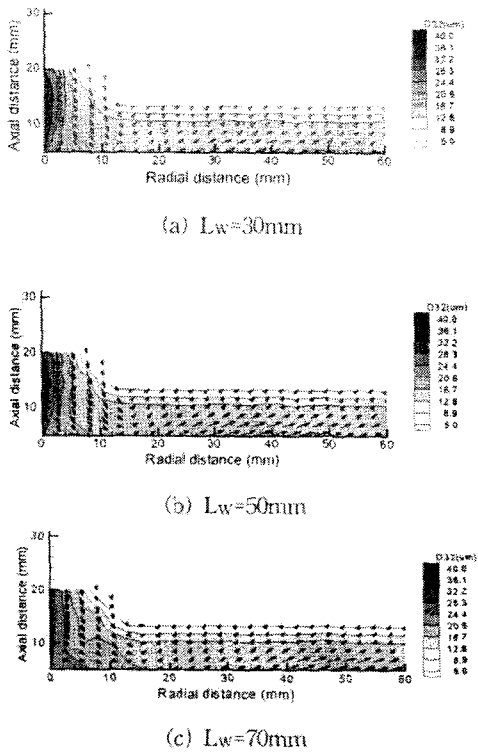


Fig. 13 Velocity and SMD distribution (Impingement spray)

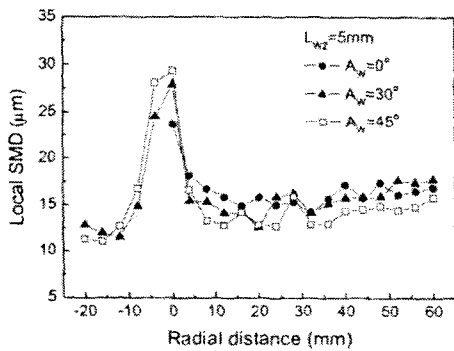


Fig. 14 Effect of wall inclination on the SMD distribution

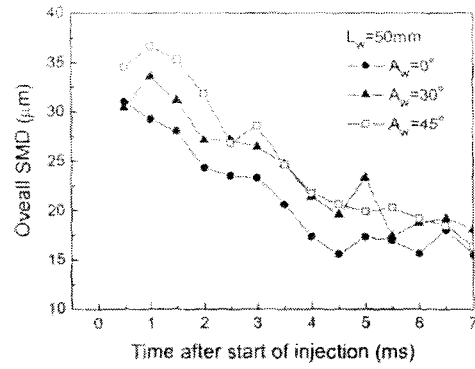


Fig. 15 Overall SMD of different wall inclination

#### 4. 결론

커먼레일식 고압 디젤 인젝터 분무의 충돌 거리와 충돌 각도에 따른 연료 분무 미립화 특성에 대한 분석 결과로부터, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 자유 분무의 경우 노즐 부근 중심축에서 SMD가 최대이며, 외곽에서는 항력의 증가로 인해 SMD가 감소하였다.
- (2) 충돌 분무는 2차 미립화의 영향으로 자유 분무에 비해 SMD가 더 작아지는 것으로 나타났다.
- (3) 충돌면에서 10mm 상류에서는 SMD 분포가 충돌의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.
- (4) 인젝터와 충돌면 사이의 거리가 50mm인 경우가 70mm인 경우보다 분무 중심에서는 SMD가 더 작은 것으로 나타났다. 이는 거리가 50mm인 경우 2차 미립화의 영향이 70mm인 경우보다 더 크기 때문인 것으로 판단된다.
- (5) 충돌면의 기울임 각도가 SMD에 미치는 영향을 분석한 결과, 충돌면과 분무의 진행 방향이 수직인 경우 2차 미립화의 영향으로 인해 SMD가 가장 작게 나타났다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적 기초 연구 사업 (R-01-2000-000303-0 (2002))의 연구지원에 의하여 수행되었으며, 연구를 지원해주신 관계 기관에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) K. Ko and M. Arai, "The characteristics of postimpingement diesel spray, part I: penetration and volume", *Atomization and sprays*, Vol 12, pp. 403-417, 2002
- (2) K. Ko and M. Arai, "The characteristics of postimpingement diesel spray, part II: empirical equation of penetration", *Atomization and sprays*, Vol 12, pp. 419-430, 2002
- (3) R. M. Montajir, H. Tsunemoto, H. Ishitani and T. Minami, "Fuel spray behavior in a small DI diesel enging: effect of combustion chamber geometry", *SAE Paper*, 2000-01-0946, 2000
- (4) 서상현, 김형준, 이창식, "레이저 시트법을 이용한 커먼레일식 디젤 인젝터의 벽면 충돌 분무 거동 해석", *한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집*, pp.380-385, 2003
- (5) E. Schunemann, S. Fedrow and A. Leipertz, "Droplet size and velocity measurements for the characterization of a DI-diesel spray impinging on a flat wall", *SAE Pper*, 982545, 1998
- (6) U. Meingast, M. Staudt, L. Reichelt, U. Renz and F.-A. Sommerhoff, "Analysis of spray/wall interaction under diesel engine conditions", *SAE Paper* 2000-01-0272, 2000